

報 告

トランジスタ h パラメータ測定回路の
S/N 比改善高橋恭一¹¹教育研究技術支援センター (Technical Support Center for Research and Education, Nagaoka National College of Technology)S/N RATIO IMPROVEMENT OF THE TRANSISTOR h PARAMETER
MEASUREMENT CIRCUITKyouichi TAKAHASHI¹

和文要旨

平成22年度から電気電子システム工学科では、実践的な工学教育および JABEE が重視しているデザインエンジニアリングの充実のため、実験実習内容の改革を行っている。その中で“トランジスタの h パラメータ測定”は、トランジスタおよび電子回路を理解する上で基本的な実験である。しかし、近年トランジスタの性能向上が著しく、学生実験で使用する測定機器の性能では、測定精度の高い実験が大変難しい。シリコントランジスタおよびゲルマニウムトランジスタの h パラメータを、これまで用いていた h パラメータ測定回路を改良した回路で測定し、S/N 比 5 [dB] 以上の改善を実現した。この修正トランジスタ h パラメータ測定回路の本校電気電子システム工学実験Ⅱへの適用について報告する。

Key Words : h paramater, germanium transistor, s/n ratio, measurement circuit

1. はじめに

平成22年度から電気電子システム工学科では、実践的な工学教育の充実のため、実験実習内容の改革を行っている。これは、JABEE が重視しているデザインエンジニアリングの充実を図ることにもなる。その中で、電気電子システム工学実験ⅠおよびⅡの内容の改善をはかっている。

電気電子システム工学実験Ⅱの中に、アナログ電子回路の実験をまとめて6週間でトランジスタの静特性の測定から回路の設計・製作を行うテーマがある。この実験の中で、“トランジスタの h パラメータ測定”を行う内容がある。

トランジスタの h パラメータは、トランジスタの等価回路を導くための基本的な量であり、回路の設計にも必要なものである。そのため、多くの電気電子系の学科において、この“トランジスタの h パラメータ測定”の実験が実施されている。しかし、その測定回路は、ゲルマニウムトランジスタ若しくは初期のシリコントランジスタを対象に設計されたものがそのまま使用されている場合が多い。近年ではトランジスタの性能向上が著しく、四つの h パラメータの中には、学生実験で用いる測定機器では、高い精度で測定するのが困難な場合がしばしばある。

本稿では、従来用いられている h パラメータ測定回路を改良し、測定のス/N 比を向上した結果について述べる。

この修正測定回路を用いることにより、S/N 比を 5 [dB] 以上改善することができた。また、この修正測定回路を本校電気電子システム工学実験Ⅱに適用することを検討したので、その検討結果について述べる。

2. 従来型測定回路による新旧トランジスタ別 h パラメータ測定¹⁾

エミッタ接地回路の h パラメータは、図-1 で示される四端子回路において、入出力の 4 つの変数 v_1 , v_2 , i_1 , i_2 を関連付ける線形表現の式として、(1) と(2) 式のように定義されている。

$$v_1 = h_{ie}i_1 + h_{re}v_2 \quad (1)$$

$$i_2 = h_{fe}i_1 + h_{oe}v_2 \quad (2)$$

式 (1), (2) から h パラメータを測定するための具体的な回路を考えると、第一項の変数値 i_1 を 0 にしてパラメータ値を求める回路、第二項の変数値 v_2 を 0 にして、パラメータを求める回路の 2 種類の回路にまとめられる。回路の差異は交流電圧、交流電流を各々 0 にする回路であり、この条件を実現する回路素子として、電流 0 はインダクタンスを、電圧 0 はキャパシタンスを用いて回路を構成することができる。

電気電子システム工学実験Ⅱのテーマ再編にともない、トランジスタ h パラメータ測定を直流バイアス印加状態で、小さな交流信号を重畳する形式で実施することになり、あらたに実験装置を製作した。従来型の h パラメータ測定回路の h_{oe} 測定結線図を図-2 に示す。この実験装置を同時実施する必要班数分 5 セットを製作した。

このトランジスタ h パラメータ測定装置を用いて測定する際の注意点は以下のとおりである。

- ① トランジスタの静特性を十分理解していること。
 h パラメータは、トランジスタの静特性上の任意動作点において、電圧及び電流の微小変化（小さな交流信号）から測定することを常に意識しながら実験を遂行する。
- ② 各測定機器筐体間の直流電位を考慮しつつ、併

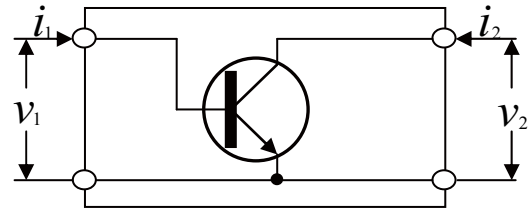


図-1 四端子回路

せて交流インピーダンスにも配慮し、ノイズの混入を極小にする測定機器レイアウトと配線の取り回しを心がける。

- ③ 電源ラインの三極アース付きコンセントによる接続は禁止である。理由は、二つの交流電子電圧計の筐体がアース付きコンセントを経由し同電位になることにより、浮動点間の電圧測定が不可能になる。また、場合によっては、直流電源回路的に短絡回路が構成されることがあり、危険である。
- ④ 図-2において、エミッタ電流設定はエミッタ抵抗 R_{ev} を操作すると容易であるが、信号電圧 0 設定の下で $E_{ce} > E_{be}$ の関係を保っていることを常に確認しながら調整を行う必要がある。また、 R_{ev} の回転方向と電流値の増減関係を念頭におきながら行う。尚、本稿の実験においては、

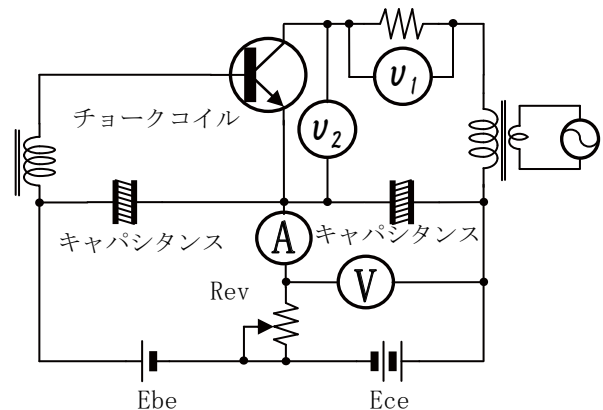


図-2 出力アドミタンス (h_{oe}) 測定結線図

表-1 2SC1815 (Y) の出力アドミタンス (h_{oe}) 測定時のノイズレベル

v_1	130 [μ V]	$E_{ce}=6[V]$ $I_E=0.1[mA]$
v_2	800 [μ V]	



写真-1 2SC1815 (Y) の hoe 測定時の配置と配線の例

トランジスタの直線領域を逸脱する大信号印加電圧値の判断基準は、無信号時設定エミッタ電流値と信号印加によるエミッタ電流上昇値の差を10 [%]とした。

以上を考慮した機器のレイアウトと配線の例を写真-1に示す。留意点は、測定器の筐体間を離して信号の流れる方向が交差しないように設置し、配線長を短くしていることである。この回路を用いて測定したノイズレベルを表-1に記す。

2. 1 ゲルマニウムトランジスタの h パラメータ測定

トランジスタの h パラメータ測定回路は、ゲルマニウムトランジスタ及び初期のシリコントランジスタなどを対象に、測定回路が開発され利用されてきた。

そこで、古いトランジスタラジオの中にあったゲルマニウムトランジスタを測定対象に、図-2の回路を用いて測定を行い、測定精度の評価を行った。尚、今回製作した回路は NPN 型トランジスタを対象にしていたため、製作した 5 セットの測定装置の一つを PNP 型トランジスタ用に改変し、測定を実施した。測定に使用したゲルマニウムトランジスタの

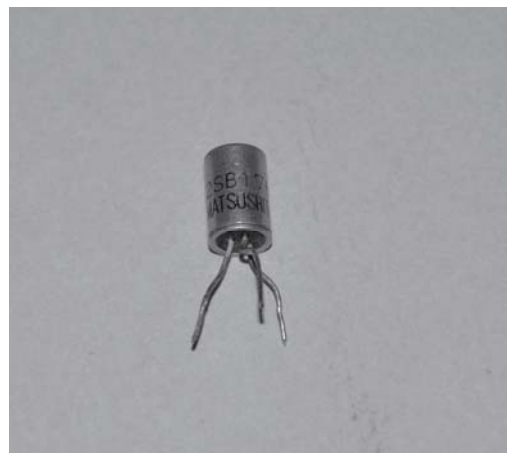


写真-2 2SB175 (B) の外観

表-2 2SB175 (B) の主要性能

Vcbo	-30 [V]	
Ic	-100 [mA]	
Pc	125 [mW]	
Tj	85 [°C]	
Icbo	-3 ~ -12 [μA]	
Iebo	Typ -2 [μA]	Veb -10 [V]
fαb	Typ 700 [KHz]	
hfe	85~220	Vcb -6 [V],Ie 1 [mA]

2SB175 (B) の外観を写真-2に、主な特性を表-2に示す。

表-2から明らかなように、シリコンと比較して、ベース電極への漏れ電流が大きく、許容接合温度が低い。これは、測定時の操作ミスでトランジスタを容易に破壊する可能性があり、注意して測定を実施する必要がある。

一方、トランジション周波数 (f_{ab}) は、現在低周波増幅用に多く使われているトランジスタと比較すると 1/100 位であり、高周波ノイズに反応しないことから、測定精度は高くなることが期待される。

ここでは、測定した四つの h パラメータの中で値が小さく、ノイズの混入がし易い h_{re} と h_{oe} について測定ノイズの影響を検討する。 h パラメータの測定に影響が大きいノイズレベルの測定を実施した。ノイズレベルの測定は、信号電圧を 0 設定にし、 h_{re} 測定時はベース、エミッタ間電圧、 h_{oe} 測定時は電流検出抵抗両端の無信号電圧を測定した。測定した電圧とトランジスタの線形領域内のそれぞれの信号電圧値との比を S/N 比として求めた。これらの測定結果を図-3に示す。

2SB175 (B) のデータシートが入手不可能であったため、測定結果の h_{re} , h_{oe} 値のメーカ発表値と比較することはできないが、得られた値は、 h_{re} が 6×10^{-4} , h_{oe} が 4×10^{-4} [S]であり、ゲルマニウムトランジスタとして妥当な値といえる。

測定時の S/N 比は、 h_{re} は 10~20 [dB], h_{oe} は 6~28 [dB] であった。尚、 h_{ie} , h_{fe} 測定時の S/N 比は 20 [dB] 以上であった。

2. 2 最近のトランジスタの測定結果

平成22年度前期、電気電子システム工学実験 II で測定対象としている 2SC1815 (Y) に、2.1で述べた方法で h パラメータと S/N 比の測定を行った。

2.1と同様 h パラメータの値が小さい h_{re} , h_{oe} 二つの測定結果を図-4に示す。測定結果から、2SC1815 (Y) の常用電流域 1~5 [mA] における h_{re} の最小値は 1×10^{-4} , h_{oe} は 1×10^{-5} [S] が得られた。この値をメーカー発表のデータシートと比較すると、オーダーと傾向がほぼ一致している。しかし、表-1に示したノイズ電圧値と検出信号電圧値がほぼ拮抗し、 h_{re} は逆方向伝達電圧を示す式 (1) の v_1 , h_{oe} 測定では電流測定用電圧の図-2における v_i の変動が大きく、測定精度は低いと考えられる。

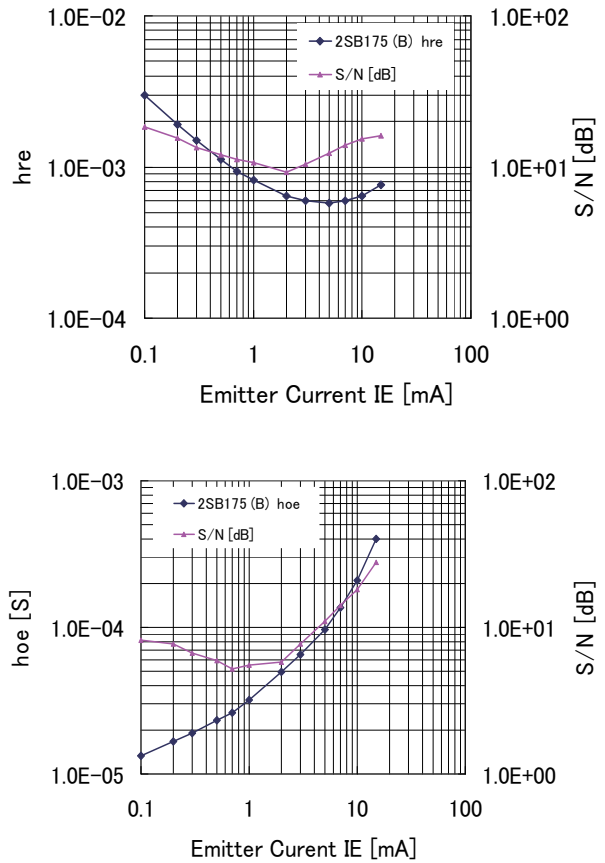


図-3 2SB175 (B) の測定結果

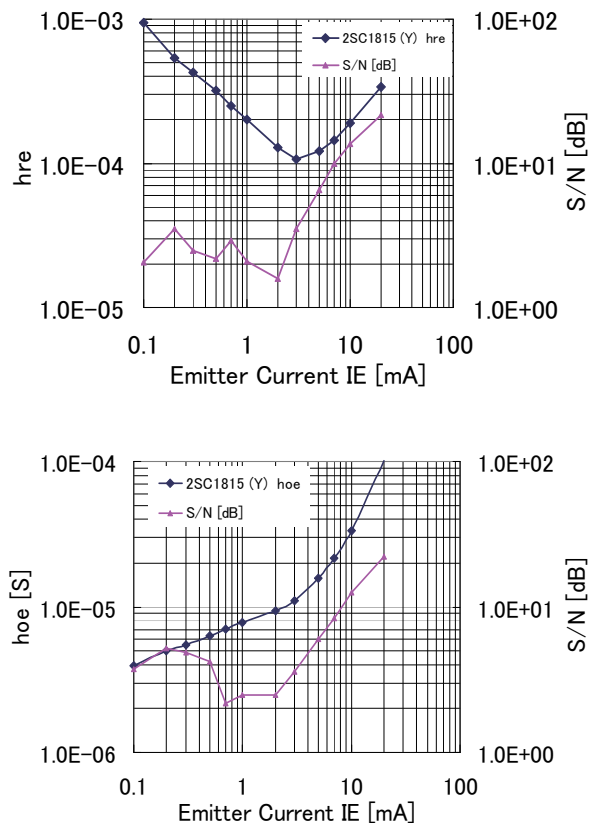


図-4 2SC1815 (Y) の測定結果

3. 修正測定回路による h パラメータ測定

2.1 および 2.2 の測定結果より、h パラメータ測定回路の hre, hoe 両パラメータ測定時の S/N 比について検討すると、2SC1815 (Y) はゲルマニウムトランジスタと比較して約 4 [dB] 以上悪化している。この原因は測定結果より、hre については、2SC1815 (Y) は 2SB175 (B) の概略 1/10 で、hoe も 2SB175 (B) の概略 1/10 である。このことは 2SC1815 (Y) は 2SB175 (B) の、式 (1), (2) において、hre 測定時は v_1 、また hoe 測定時は i_2 もそれぞれ 1/10 になり、信号電圧値が小さいことによるものと考えられる。

S/N 比を改善するには、トランジスタの線形表現可能な範囲で信号電圧を上昇させるか、あるいは雑音電圧レベルを更に小さく必要がある。信号電圧を上昇させるには、線形領域内が原則で既述した 2. の④の線形判断基準から、これ以上の増加は不可能であった。

よって S/N 比改善には、ノイズレベルを更に低下させる必要がある。

そこで、h パラメータ測定回路の S/N 比を改善するため、次の項目により回路を構成し、図-5のように改善した。

- ① 微小電圧測定側の電子電圧計にはシールドプローブを使用する。(図-5 v_1')
- ② 開放要素として用いるチョークコイルには、コンデンサを並列接続して、測定周波数に共振させてインピーダンスを極大に、それ以外の周波数ではインピーダンスが低下するように回路修正する。²⁾ (図-5 Cr)

2SC1815 (Y) の hre, hoe およびそれぞれの S/N 比測定結果を図-6, 図-7に示す。図には、2. 2 の図-4のデータも比較のために示してある。

グラフから hre, hoe 共に測定時の S/N 比が 5 [dB] 以上改善され、微小電圧測定に用いた電子電圧計の指示値も安定していた。S/N 比向上により、特に h パラメータ値がエミッタ電流 5 [mA] 以下で顕著な改善結果が得られた。

4. 学生実験への導入について

電子工学、回路工学に関係する授業では、小信号等価回路を用いることによりトランジスタの特性を

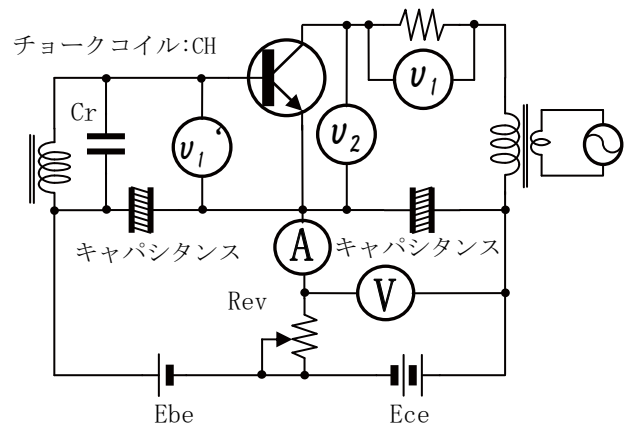


図-5 出力アドミタンス (hoe) 測定結線図

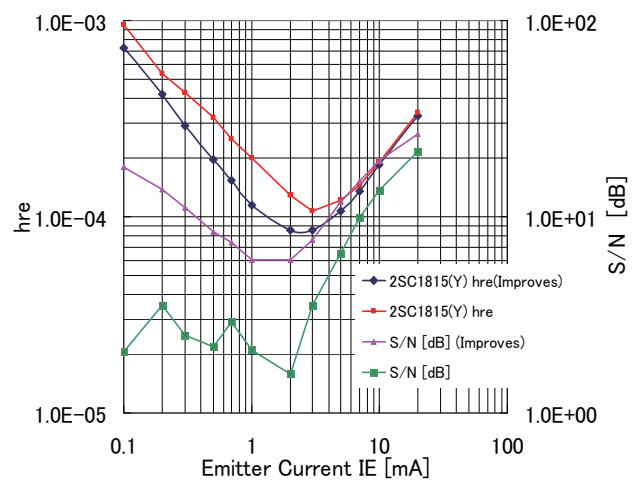


図-6 改善前後の測定結果比較
(2SC1815 (Y) hre)

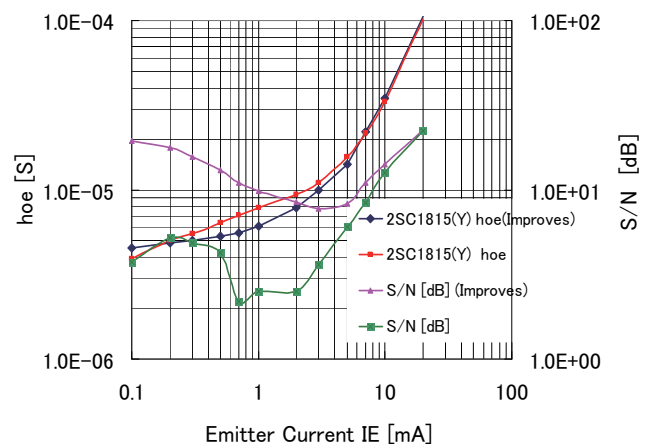


図-7 改善前後の測定結果比較
(2SC1815 (Y) hoe)

線形表現して取り扱い、回路解析や動作原理を解説することが多い。学生諸君への理解の手順としては、トランジスタの静特性を解説した後、h パラメータなどの装置パラメータの解説に入ることが多いと思

われる。授業では、半導体素子が持つ全体特性として持っている非線形性特性について説明し、その中で、活用領域が何処であるのかを解説しなければならない。学生諸君がこれらのことを理解するには、授業だけでは難しいと考えられる。

そこで、学生実験で実際に直流電圧（バイアス）を加えたトランジスタ動作状況下で、微小交流信号を加え、各種のパラメータを測定することは、トランジスタの動作原理や特性を理解し、増幅作用などの原理を理解する手助けとして大変有用と考えられる。授業との関連付けをしながら実験を進めれば、更に大きな効果があると考えられる。

学生実験においては、S/N 比が小さいために測定電圧の変動が大き過ぎる状況があると、それはそれで測定実験としての意義があるものの、トランジスタ特性の理解や実験自体への意欲を阻害する。この点で本稿における 5 [dB] 以上の S/N 比改善は大きな意義がある。更にそれを具現するためには機器レイアウトや配線方法には十分な注意が必要であり、実験を体験することにより、緊張感や注意力を涵養することもできる。

以上に加え、積極的な実験姿勢として推奨しないが、トランジスタの価格も廉価であることから、測定中にトランジスタを壊すこともむしろ教育として良いことであるかもしれない。試用サンプルであるトランジスタの交換が容易に行える工夫を施した装置を準備し、色々な条件での測定を実施することができれば、トランジスタの h パラメータ測定は、トランジスタの特性理解において、更に有効な効果が期待できると思われる。

5. 結論

トランジスタの h パラメータ測定回路は、その時代の半導体素子を対象に開発されている。半導体素子は時代とともに特性改良されていくが、多くの教育機関では、学生実験のテーマとしてトランジスタの h パラメータ測定は継続的に行われていたと思われるが、測定回路とその方法についての改善は十分でない場合が多いと推察される。

本稿で検証を行ったように、ゲルマニウムトランジスタあるいは初期型トランジスタを対象にした図-2による測定回路での h パラメータ測定は、S/N 比も大きく測定精度が高く測定されるものの、最新のトランジスタについては特性向上から S/N 比が小さくなって測定精度が低いことが分かった。

過去、本校ではトランジスタ h パラメータ測定回路の S/N 比改善のために、浮動点間電位差を測定するのに、一般商用電源を用いない充電式電子電圧計（当時の名称 トラボル）や測定用絶縁トランスなどを準備し実験を実施した経緯があった。しかし、これらの改善を施した学生実験が継続しなかった理由の一つは、これらの測定機器が特殊な部類にあるもので、設備更新が困難であったことによると考えられる。

本稿 3. の ① および ② の方法、図-5の測定回路による S/N 比改善は、特殊測定器を必要としないため、継続性は維持可能である。また、改善効果も 5 [dB] 以上と大きいため、測定に際しての学生諸君の意欲の低下を妨げる。

これまで述べた改善法の他、デジタル信号処理技術あるいは BPF (Band Pass Filter) などを用いて、高精度な信号電圧抽出を行うことも有効な方法と考えられる。また、差動電圧計による信号電圧の測定も考えられるが、測定器の価格が高く、学生実験装置としての規模が大きくなるという問題がある。もう一つの改善法は、学生諸君への交流電流経路の理解をしにくくする結果になるかも知れないが、電流検出用抵抗をアース側に施設しインピーダンスの低いところで電流検出し、S/N 比の改善を図ることも考えられる。

現在では希少となったゲルマニウムトランジスタを測定するに際して、感じたことがあった。電極構成が PNP 型で現在多用される NPN 型と違うことも、測定中にトランジスタを壊す要因の一つにある。筆者の過去の経験では、現在のトランジスタとは違い、ゲルマニウムトランジスタは容易に破壊するため、各種特性測定時に、稚拙な知識、機器の操作や設定ミスなどの原因から、当時相当に高価なトランジスタを破壊したことがあった。今、本稿を執筆するにあたりゲルマニウムトランジスタの特性測定には相応な刺激と興奮があった。このように、時代とともに発達進化する電子デバイスの特性測定を体験することにより、若い学生諸君には、その時代の工業製品について新鮮で刺激的な体験を感じてもらい、感動と興味を持っていただけることを願っている。

参考文献

- 1) 社団法人電気学会，代表者 田中 守 也：電気実験・電子編，トランジスタの h パラメータの測定，pp. 39-40, 1996.

- 2) 高橋恭一：RC サーボモータを用いた LC 共振回路
の自動同調装置，長岡工業高等専門学校 技術支援セ
ンターレポート，第6号，pp. 1-5, 2009.

(2010. 10. 4 受付)